

Канд. техн. наук К. О. Никитенко, А. В. Шулік, С. В. Залевський

ТЕРМІЧНЕ РОЗКЛАДАННЯ ПЕРЕКИСУ ВОДНЮ У ВОГНЕВОМУ ПРОСТОРИ ГАЗОГЕНЕРАТОРА. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ

Розроблені дві моделі для дослідження термічного розкладання концентрованого перекису водню: у потоці високотемпературних продуктів розкладання (1) та для розрахунку властивостей продуктів розкладання після каталізатора (2). Першу модель застосовують для стаціонарної адіабатичної течії, вона містить умови масового балансу, випаровування краплі, розкладання в газовій фазі та закони збереження в контрольному об'ємі. Модель ураховує ступінь концентрації концентрованого перекису водню первинного та вторинного потоків, масові витрати потоків, початкові температури рідкого концентрованого перекису водню, що надходить у різні зони газогенератора. Друга модель зручна для розрахунків властивостей продуктів розкладання після каталізатора, де відбувається повне розкладання концентрованого перекису водню, параметри парогазу визначають тільки енергетичним балансом реакції розкладання. Ця модель також ураховує концентрацію рідкого перекису та його початкову температуру. Результати розрахунку течії за першою моделлю демонструють значний вплив на процес розкладання концентрованого перекису водню з певним розміром краплі і витрати вторинного, впорскуваного, потоку. У цілому результати розрахунку показують, що є обмеження за кількістю вторинного потоку (маса вторинного потоку не повинна перевищувати ~30–40 % від загальної маси, що проходить через контрольний об'єм газогенератора, оскільки на випаровування рідкого перекису витрачається тепло від первинного потоку і його температура на початку зони перемішування знижується) та що існує оптимальний діаметр крапель під час розпилювання вторинного потоку, який зумовлений допустимим часом перебування у вогневому просторі газогенератора (а також припустимим ступенем локального зменшення температури в місці впорскування рідкого перекису: чим менше крапля, тим більша інтенсивність випаровування та більше відбирання тепла від високотемпературного газу). Рекомендовано спрощений підхід до розрахунку параметрів парогазу за умови, що витрата вторинного потоку не перевищуватиме ~25 % від загальної.

Ключові слова: перекис водню, термокаталітичний газогенератор, парогаз, продукти термічного розкладання.

Two models have been developed to investigate the thermal decomposition of concentrated hydrogen peroxide: in a flow of high-temperature decomposition products (1) and for an analysis of properties of decomposed products after a catalyst bed (2). The first model assumes steady, adiabatic flow and accounts for mass balance conditions, drop evaporation, decomposition in the gas phase, and conservation laws for a volume under analysis. The model considers various CHP concentration levels for both primary and secondary flows, mass flow rates for both flows, and initial temperatures of liquid CHP fed to different zones of the preburner. The second model is suitable for analyzing the properties of decomposition products after a catalyst, where the complete decomposition of concentrated hydrogen peroxide occurs. The parameters of steam gas are determined by energy balance in a CHP decomposition reaction. This model also accounts for the concentration of liquid CHP and its initial temperature. The analysis results for the first model indicate the significant effect of droplet size and the rate of the secondary injectant flow on the decomposition process. In general, the results demonstrate a limitation for the amount of the secondary flow (the mass of the secondary flow should not exceed ~30–40 % of the total mass in the preburner volume under analysis, as the process of liquid hydrogen peroxide evaporation consumes heat from the primary flow, and its temperature drops at the beginning of the mixing zone). The results also reveal that the optimal droplet size of injectant flow exists, caused by the admissible time of residence in the preburner's flame zone. The droplet size also impacts the allowable level of local temperature drop at the CHP injection area: the smaller the drop size, the more intense the evaporation, and the more heat is consumed from the high-temperature gas. A simplified analysis of properties of CHP decomposition products is offered, assuming the mass flow rate of the secondary flow is less than ~25 % of the total amount.

Keywords: hydrogen peroxide, thermo-catalytic preburner, steam gas, thermal decomposition products.

Вступ

Останніми роками виявляють підвищений інтерес до концентрованого перекису водню (КПВ), як до перспективного компонента палива (окиснювача), завдяки його низькій токсичності, відносній простоті застосування та зберігання. Характеристики КПВ, як монопалива, також викликають значний інтерес для застосування. Продукти його розкладення можна використовувати для енергогенерації у двокомпонентних схемах з допалюванням. Для ініціації процесу розкладання цієї рідини часто використовують спеціально розроблені катализатори з наповненням у вигляді сітки або гранул. Проте за значних витрат КПВ через катализатор об'єм останнього зростає, що робить конструкцію з катализатором громіздкою для використання в ракетному двигуні. У зв'язку із цим значний інтерес викликають питання окремого впорскування рідкого КПВ у зону течії продуктів термічного розкладання перекису за пакетом катализатора для зменшення його маси. Таку концепцію двозонного розкладання КПВ зручно реалізувати в газогенераторі (ГГ), що працює на монопаливі. У цій концепції рідина, що впорскується у високотемпературні продукти розкладення, проходить стадії нагрівання краплі, її випаровування та термічного розкладення пари КПВ з виділенням тепла.

У цій статті ми зосередимося на описуванні двох математичних моделей: для інженерних розрахунків процесу каталітичного розкладення КПВ і одномірної моделі термічного розкладення крапель у високотемпературній зоні течії продуктів розкладання із зони з катализатором. Перша модель – «Модель енергетичного балансу» – дозволяє отримати температуру продуктів розкладання на виході з катализатора, спираючись на розрахунок енергетичного балансу реакції повного розкладення КПВ. Друга модель – «Модель теплового балансу в контрольованому об'ємі» – розподіляє температуру по довжині термокамери та прогнозує повноту розкладення парів КПВ на виході з контрольованого об'єму.

Результати отримано тільки на основі запропонованих розрахункових моделей і подано для різних умов течії.

Модель енергетичного балансу. Властивості продуктів повного розкладення КПВ

Аналіз властивостей парогазу (продуктів розкладення КПВ) виконано за припущення, що каталітичне розкладення КПВ (катализатор – це, умовно, перша зона реакції компонента палива у ГГ) відбулося повністю, продукти розкладення є однорідними у всьому об'ємі газу, складаються із суміші газоподібного кисню та водяної пари та підпорядковані рівнянню стану ідеального газу, течія адіабатична.

У деяких працях наведено дані з тепловиділення під час розкладання КПВ за допомогою твердого катализатора. Дані про температуру й енергію, яка виділяється, дещо відрізняються, що може бути пов'язано із застосуванням різних типів катализаторів і з умовами експериментів. Так, температуру продуктів розкладання 95 % перекису зазначають від 890 °C [1] до 873 °C [2], 843 °C в [3] та 869 °C в [4] (остання отримана екстраполяцією наведених даних для інших концентрацій при 1 атм.). При цьому в роботі [1] автори зазначають, що дійсне тепловиділення перекису водню за допомогою твердого катализатора приблизно становить 0,92...0,95 від теоретичного. Тому можна припустити, що дійсна температура продуктів розкладання становитиме 819...846 °C.

Високотемпературне робоче тіло (продукти розкладення КПВ) не містить твердих частин, сажі та конденсованих фаз.

На рис. 1 наведено масові й об'ємні долі продуктів розкладання, а також значення середньої молекулярної маси μ парогазу під час розкладання КПВ різної концентрації [1].

Автори роботи [2] зазначають, що теоретичну температуру та склад генераторного газу повністю визначають концентрацією і вони не залежать від тиску: компоненти генераторного газу – кисень і водяна пара – майже не дисоціюють, і склад газу визначають матеріальним балансом реакції розкладання. Для 95 % перекису водню наведено такий склад і параметри продуктів розкладання в [2], табл. 1.

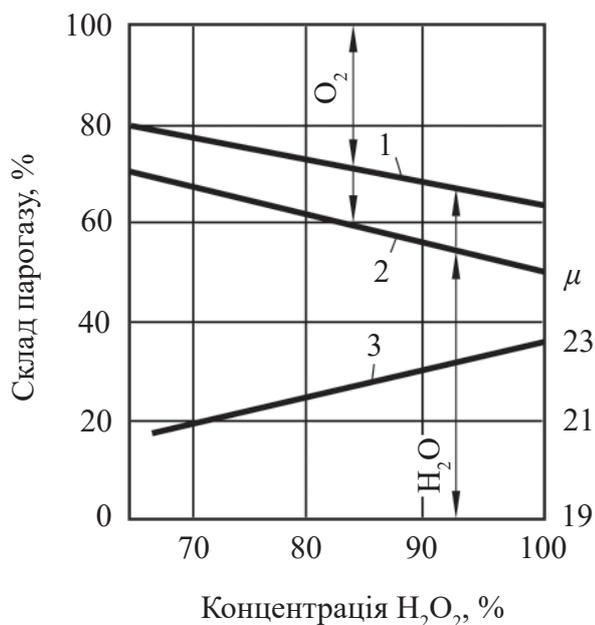


Рис. 1. Склад і молекулярна маса μ продуктів розкладання КПВ різної концентрації (за даними [1]):

1 – об'ємний склад; 2 – масовий склад;
3 – молекулярна маса

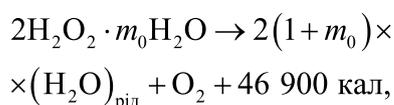
Таблиця 1

Хімічний склад і параметри продуктів розкладання 95 % перекису водню (за даними роботи [2])

Склад або параметр	Значення
Масова доля O_2 , g(O_2)	0,459
Масова доля водяної пари, g(H_2O)	0,541
T, °C	873,0
R, Дж/(кг·К)	379,0
k_{cr}	1,261
Витратний комплекс, м/с	988,0

Температура продуктів розкладання, зазначена в табл. 1, близька до отриманої авторами [5] і становить $\sim 1\,150\text{ K}$ (877 °C).

Автори в роботі [3] наводять розрахунок параметрів парогазу, спираючись на рівняння реакції розкладання КПВ і кількість теплоти, яка виділяється в процесі повного розкладання КПВ:



$$\text{де } m_0 = \frac{\mu H_2O (100 - \sigma_0)}{18 \cdot \sigma_0} = 1,89 \frac{100 - \sigma_0}{\sigma_0},$$

m_0 – число молей води в одному молі КПВ. Для 95 % КПВ $m_0 = 0,099\,474$; σ_0 – концентрація КПВ у відсотках.

У роботі [3] є неточності в даних, які використовують для розрахунку температури парогазу. Так, ми уточнили теплоту пароутворення сухої водяної пари r'_n (при 100 °C $r'_n = 540$ ккал/кг) і теплоємності продуктів розкладання для широкого діапазону температури суміші продуктів розкладання ($813 \dots 940\text{ °C}$):

– добуток молекулярної ваги на теплоємність водяної пари:

$$\mu H_2O \cdot C_{p_{H_2O}} = 0,002\,77 \cdot t + 7,930\,39, \\ \text{ккал/град (t в °C);}$$

– добуток молекулярної ваги на теплоємність газоподібного кисню:

$$\mu O_2 \cdot C_{p_{O_2}} = 0,000\,91 \cdot t + 7,690\,25, \\ \text{ккал/град (t в °C).}$$

Необхідно зауважити, що в рівнянні реакції розкладання КПВ зазначено теплоту реакції (46 900 кал або в перерахунку на 1 моль перекису – 23 450 кал) для початкової температури рідкого перекису 25 °C . Для інших температур тепловий ефект реакції необхідно розраховувати. З урахуванням зазначеного в рівнянні теплового балансу (переходячи від одиниці вимірювання грам на калорію до одиниці вимірювання кілограм на кілокалорію) маємо:

$$18(1+m_0) \cdot r'_n + 0,5 \cdot \mu \cdot C_{p_{O_2}} \cdot t + \\ + (1+m_0) \cdot \mu \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot t = 23\,450 \text{ ккал.}$$

З цього рівняння отримуємо розрахункове рівняння для температури парогазу (за початкової температури перекису 25 °C):

$$t = \frac{23\,450 - 9\,720 \cdot (1+m_0)}{0,5 \cdot \mu \cdot C_{p_{O_2}} + (1+m_0) \cdot \mu \cdot C_{p_{H_2O}}}.$$

Знаходимо температуру парогазу t , вона дорівнює $825,8\text{ °C}$.

Якщо температура КПВ відрізняється від 25 °C , то необхідно спочатку перерахувати тепловий ефект реакції Q_r (у формулі вище

$Q_i = Q_{25} = 23\,450$ кал/моль) у розрахунку на один моль за залежністю

$$Q_i = 3\,400(Q_{25} - (1 + m_0) \cdot \Delta i) / 100,$$

кал/моль,

де Q_{25} – це кількість тепла під час розкладання 100 % КПВ за температури рідини 25 °С, $Q_{25} = 689,706$ ккал/кг (що дорівнює 23 450 кал/моль); Δi – приріст / зниження ентальпії рідкого КПВ відносно базової температури (25 °С).

$$\Delta i = (25 - t_i) \cdot C_{p_1}, \text{ ккал/кг},$$

де $C_{p_1} = 0,645$ ккал/(кг·К) – теплоємність рідкого перекису; t_i – температура рідкого перекису на вході до каталізатора, °С.

Наприклад, для температури 22,1 °С на вході до каталізатора ГГ та для 100 % КПВ $Q_{t_{22}} = 23\,380,1$ кал/моль, а для температури на вході 58,3 °С маємо $Q_{t_{58}} = 24\,252,916$ кал/моль.

Склавши рівняння балансу аналогічно наведеній вище послідовності, можна отримати температуру повного термічного розкладання 95 % КПВ:

- для $t_0 = 22,1$ °С отримуємо $t = 822,5$ °С;
- для $t_0 = 58,3$ °С отримуємо $t = 869,8$ °С.

Інші властивості продуктів повного розкладання КПВ визначають таким чином: теплоємність продуктів розкладання для різних температур t (в °С) можна розрахувати за допомогою залежності (теплоємність у ккал/(кг·К)):

$$C_p = (1 - 0,004\,71 \cdot \sigma_0) \times \\ \times (0,000\,17 \cdot t + 0,429\,73) + \\ + 0,004\,71 \cdot \sigma_0 \cdot (0,000\,04 \cdot t + 0,227\,22),$$

де $(1 - 0,004\,71 \cdot \sigma_0)$ – масова частка водяної пари в продуктах розкладання, а $0,004\,71 \cdot \sigma_0$ – масова частка газоподібного кисню.

Газова стала продуктів розкладання залежить тільки від концентрації КПВ:

$$R = 0,004\,71 \cdot \sigma_0 \cdot R_{O_2} + \\ + (1 - 0,004\,71 \cdot \sigma_0) \cdot R_{H_2O}, \text{ Дж/(кг·К)},$$

де $R_{O_2} = 259,844$, Дж/(кг·К) – газова стала кисню; $R_{H_2O} = 461,537\,6$, Дж/(кг·К) – газова стала водяної пари.

Показник процесу розширення:

$$k = C_p / (C_p - R).$$

Динамічна в'язкість продуктів розкладання КПВ, кгс·с/м²:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i N_i \sqrt{M_i})}{\sum_{i=1}^n (N_i \sqrt{M_i})},$$

де під знаком суми – параметри продуктів розкладання КПВ, кисню та водяної пари:

– для газоподібного кисню: динамічна в'язкість $\mu_i = 0,330\,09 \cdot 10^{-8} \cdot t + 2,424\,9 \cdot 10^{-6}$, кгс·с/м², температура продуктів розкладання t в °С; $N_i = 1$ – молярна частка; $M_i = 32$ – молярна маса;

– для водяної пари: $\mu_i = 0,329\,84 \cdot 10^{-8} \cdot t + 1,082\,9 \cdot 10^{-6}$, кгс·с/м², температура продуктів розкладання t в °С; $N_i = 2(1 + m_0)$, для концентрації КПВ 95 % $m_0 = 0,099\,47$; $N_i = 2,198\,9$; $M_i = 18$.

Витратний комплекс (м/с):

$$\beta = \frac{\sqrt{R \cdot t}}{A_n},$$

де R та t в одиницях вимірювання СІ; A_n – відомий безрозмірний коефіцієнт, що залежить від показника адиабати продуктів розкладання k .

У другій зоні термокatalітичного ГГ відбувається впорскування рідкого КПВ у потік гарячих газоподібних продуктів кatalітичного розкладання перекису. Витрату рідкого КПВ розглядатимемо як вторинний потік, а витрату з першої зони ГГ – як основний (первинний). У другій зоні ГГ відбувається сукупність таких процесів, як впорскування крапель, нагрівання рідини крапель до температури випаровування, випаровування перекису з поверхні крапель і, нарешті, розкладання пари КПВ. Тільки остання стадія супроводжується виділенням тепла, решта відбуваються з його поглинанням: тепло відбирається від первинного потоку (потіку від кatalізатора). Ідеальна температура продуктів розкладання КПВ може бути досягнута тільки за повного завершення зазначених фізичних процесів у заданих габаритах другої зони ГГ. Докладніше ці процеси, у другій зоні газогенератора, розглянуто в наступному розділі.

Модель теплового балансу в контрольному об'ємі

Розроблення моделі. Рівняння теплового балансу. Розглянемо стаціонарну одновимірну адіабатичну течію. Тертям об стінку нехтуємо. Розпилення рідини вторинного потоку розглядаємо як монодисперсне. Склад газової фази може змінюватися у часі та характеризуватися протіканням процесу випаровування крапель з наступним розкладанням перекису. Теплоємність парів перекису та продуктів розкладання залежить від температури. Теплоємність рідкого перекису в краплі від температури не залежить. Прийнято припущення, що за заданий інтервал часу нагрівається тільки та кількість рідини в краплі, яка випариться. Реакція розкладання КПВ вважається реакцією, що описана в попередньому розділі. Модель складається з таких компонентів: баланс маси й енергії, динаміка краплі, кінетика реакції розкладання.

Розглянемо деякий об'єм у другій зоні ГГ. У ньому вторинний потік КПВ з витратою $G_{2_{in}}$ у рідкій фазі розпилюється в газовому потоці з витратою G_1 продуктів каталітичного повного розкладання КПВ, які надійшли з першої зони ГГ. Зробимо припущення, що краплі отримано єдиного розміру, вони мають однакову швидкість зі швидкістю газового потоку. Задаємо певний часовий крок. Його значення обирають виходячи зі швидкості хімічної реакції розкладання: за обраний відрізок часу частина КПВ, що випарилася, не повинна встигнути розкластися повністю. Виходячи з цього крок за часом обрано 0,2 мс (може бути уточнено з умов розрахунку). Потрапляючи в гарячий парогаз, крапля підігривається в тому об'ємі рідини, який випаровується на цьому кроці (таке припущення). Відбувається випаровування цього підігрітого об'єму – перекис у газовій фазі розкладається. Ступінь його розкладання визначає поточна для заданого часового кроку температура в контрольному об'ємі.

На наступному часовому кроці розглядають той самий об'єм, але в ньому змінюється баланс по масі первинного потоку G_{1_i}

(збільшується за рахунок розкладеної пари перекису в попередній часовий інтервал), по масі підігрітої та випареної рідини вторинного потоку G_{2_i} та масі поки що не розкладеного газоподібного перекису G_{3_i} .

Рівняння теплового балансу для розглянутого об'єму запишемо в такому вигляді:

$$G_1 \cdot t_1 \cdot C_{P_1} - G_1 \cdot t_{\text{цум}} \cdot C_{P_1} = G_2 \cdot C_{P_{2p}} \times \\ \times (t_{\text{sat}} - t_{2p}) + G_2 \cdot r_{\text{вип}} + G_2 \cdot C_{P_{2r}} \times \\ \times (t_{\text{цум}} - t_{\text{sat}}) - K \cdot \Delta\tau \cdot h_{\text{рхн}} \times \\ \times (G_2 + G_3) - G_3 \cdot C_{P_{2r}} \cdot (t_1 - t_{\text{цум}}),$$

де G_1 – витрата продуктів розкладання первинного потоку (з каталізатора); G_2 – витрата з поверхні крапель вторинного потоку КПВ, яка бере участь у випаровуванні з поверхні краплі на заданому часовому кроці; G_3 – витрата газоподібного КПВ внаслідок випаровування крапель, який не встиг розкластися на попередньому часовому кроці; t_1 – температура первинного потоку на початку заданого часового кроку; $t_{\text{цум}}$ – температура суміші в кінці заданого часового кроку; t_{sat} – температура випаровування рідкого КПВ; t_{2p} – температура вторинного потоку КПВ на вході до ГГ; C_{P_1} – теплоємність суміші продуктів розкладання первинного потоку; $C_{P_{2p}}$ – теплоємність рідкого КПВ вторинного потоку; $C_{P_{2r}}$ – теплоємність газоподібного КПВ вторинного потоку; $r_{\text{вип}}$ – теплота випаровування КПВ; K – швидкість реакції термічного розкладання перекису; $\Delta\tau$ – прийнятий часовий інтервал (крок за часом); $h_{\text{рхн}}$ – теплота реакції розкладання перекису (залежить від початкового підігріву КПВ). Для КПВ з концентрацією 95 % для заданої температури рідкої краплі:

$$h_{\text{рхн}} = \frac{95Q_t}{3400} - 325,2 \text{ ккал/кг}.$$

Рівняння теплового балансу перепишемо відносно температури суміші (суміш первинного потоку, продуктів розкладання перекису на заданому часовому кроці, газоподібного перекису, що не розклався, та крапель):

$$t_{\text{сум}} = \left[\begin{aligned} &G_1 \cdot t_1 \cdot C_{P_1} - G_2 \cdot C_{P_{2P}} \cdot (t_{\text{sat}} - t_{2P}) - G_2 \cdot r_{\text{вип}} + G_2 \cdot C_{P_{2r}} \cdot t_{\text{sat}} + \\ &+ K \cdot \Delta\tau \cdot h_{\text{гxn}} \cdot (G_2 + G_3) + G_3 \cdot C_{P_{2r}} \cdot t_1 \end{aligned} \right] / (G_1 \cdot C_{P_1} + G_3 \cdot C_{P_{2r}}).$$

Для першого кроку за часом $\tau = 0 \dots 0,2$ мс витрати G_1, G_2, G_3 такі:

$$\begin{aligned} G_{1,0} &= G_1 \cdot \Delta\tau; \\ G_{2,0} &= G_{2,0 \text{ вип}}; \\ G_{3,0} &= 0; \\ t_1 &= t_{1,0}, \end{aligned}$$

де $G_{2,0 \text{ вип}}$ – витрата газоподібного КПВ на першому часовому кроці за рахунок випаровування з поверхні всіх крапель (буде розглянуто нижче); $t_{1,0}$ – температура продуктів розкладання після каталізатора.

На наступних часових кроках ці витрати такі:

$$\begin{aligned} G_{1,i} &= G_{1,i-1} + K_{i-1} \cdot \Delta\tau \cdot (G_{2,i-1} + G_{3,i-1}); \\ G_{2,i} &= G_{2,i \text{ вип}}; \\ G_{3,i} &= (G_{2,i-1} + G_{3,i-1}) \cdot (1 - K_{i-1} \cdot \Delta\tau); \\ t_1 &= t_{\text{сум } i-1}; \end{aligned}$$

де $G_{2,i \text{ вип}}$ – витрата газоподібного перекису на поточному часовому кроці за рахунок випаровування з поверхні всіх крапель.

Кількість продуктів розкладання перекису (%) відносно сумарної витрати на поточному часовому кроці визначають за залежністю

$$G_{\text{пр}} = \frac{G_{1,i}}{G_{1,i} + G_{3,i} + m_{d,i} \cdot n} \cdot 100,$$

де $m_{d,i}$ – маса однієї краплі на поточному часовому кроці; n – кількість крапель у розглянутому об'ємі.

Середній діаметр крапель після розпилення. Нижче розглянуто, як приклад, варіант розрахунку розпилення КПВ за допомогою газорідинної струминно-відцентрової форсунки. Можливі й інші варіанти розпилення, наприклад, через струминні отвори в стінці термічної зони. Остаточний вибір типу форсунки залежить від необхідних

розмірів краплі, ефективності розпилення та зручності конструктивного виконання. Визначають середній (медіанний) діаметр крапель розпилення за методикою, що викладена в [10].

Розпилення в термічній зоні ГГ (струминно-відцентрова форсунка). Для відцентрового рідинного контуру розраховують медіанний діаметр крапель за формулою

$$d_m = 269 \cdot L_p^{-0,35} \cdot \left(\frac{We \cdot \rho_r}{\rho_{\text{вх}}} \right)^{-0,483}, \text{ мм},$$

де ρ_r – густина парогазу, кг/м^3 ; $\rho_{\text{вх}}$ – густина компонента на вході до форсунки, кг/м^3 .

Критерій Вебера:

$$We = \frac{\rho_r \cdot W^2 \cdot d_c}{\sigma},$$

де W – осьова швидкість компонента на виході з форсунки, м/с ; σ – коефіцієнт поверхневого натягу впорскуваного компонента, Н/м ; d_c – діаметр сопла форсунки, мкм .

Критерій Лапласа:

$$Lp = \frac{\sigma \cdot \delta_n \cdot \rho_{\text{вх}}}{\eta^2},$$

де δ_n – товщина пелени на виході з форсунки, мм ; η – динамічна в'язкість компонента, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Приклад розрахунку параметрів роботи форсунки наведено в табл. 2.

Згідно з наведеними вихідними даними (проектувальний розрахунок) отримано діаметр краплі 171 мкм . Нижче буде рекомендовано оптимальний діаметр краплі виходячи з умов термічного розкладання в другій зоні ГГ. Для рекомендованого діаметра краплі в майбутньому необхідно дібрати конструктивні параметри форсунки та виконати чистовий розрахунок діаметра краплі після розпилення.

Таблиця 2

Вихідні дані та результати розрахунку середнього медіанного діаметра краплі в конусі розпилення струминно-відцентрової форсунки

Параметр	Найменування	Одиниця вимірювання	Значення
n	Кількість форсунок (двокаскадні газоріднинні струминно-відцентрові)	шт.	19
ΔP_{ϕ}	Перепад тиску на форсунці	кгс/см ²	15
$\rho_{\text{вх}}$	Густина компонента	кг/м ³	1 434,2
$\rho_{\text{г}}$	Густина парогазу	кг/м ³	57,145
$d_{\text{с}}$	Діаметр сопла форсунки	м	0,01
G_{ϕ}	Витрата компонента крізь форсунку	кг/с	0,497
η	Динамічна в'язкість компонента	Па·с	$8,6 \cdot 10^{-4}$
σ	Коефіцієнт поверхневого натягу	Н/м	0,079 85
$\delta_{\text{п}}$	Товщина пелени на виході з форсунки	м	$0,684 \cdot 10^{-3}$
W	Осьова швидкість на виході з форсунки	м/с	17,31
L_p	Критерій Лапласа	–	96 643,18
We	Критерій Вебера	–	2 349,777
$d_{\text{м}}$	Медіанний діаметр крапель	мкм	171

Випаровування краплі. Додавання маси газоподібного КРВ у контрольований об'єм, за рахунок випаровування краплі, розраховують за спрощеною моделлю «правило D^2 » [7] на кожному часовому кроці:

$$G_{2_i \text{ вип}} = 2\pi \cdot \frac{k_L \cdot D_i}{C_{P_{2r_i}}} \cdot \ln(1 + B_{q_i}),$$

де k_L – теплопровідність рідини; $C_{P_{2r_i}}$ – теплоємність пари перекису; D_i – діаметр краплі на поточному часовому кроці; B_{q_i} – число Сполдінга:

$$B_{q_i} = C_{P_{2r_i}} \cdot \frac{(t - t_{\text{sat}})}{\left[r_{\text{вип}} + C_{P_{2p}} \cdot (t_{\text{sat}} - t_{2p}) \right]}.$$

Параметр B_{q_i} – відношення ентальпії, яка характеризує випаровування, до ентальпії, що необхідна для випаровування рідини в краплі.

Оскільки процес випаровування краплі залежить від температури навколишнього середовища на заданому часовому кроці, то модель випаровування краплі активується на кожному часовому кроці.

Послідовність розрахунку така:

Задавши початковий розмір краплі на першому часовому кроці D_0 , визначаємо її масу:

$$m_{d_0} = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot D_0^3}{6},$$

де ρ_p – густина рідкого перекису, який подають у другу зону ГГ, кг/м³.

Визначаємо кількість крапель:

$$n = G_{2_in} \cdot \Delta\tau / m_{d_0},$$

де G_{2_in} – витрата рідкого перекису в другу зону ГГ, кг/м³.

Знаходимо витрату газу з поверхні краплі $G_{2_i \text{ вип}}$ (кг/с) і сумарну кількість перекису, який випарувався $G_{2_i \text{ вип}} \cdot n$, кг. На наступному часовому кроці уточнюємо масу краплі:

$$m_{d_i} = m_{d_i-1} - G_{2_i-1 \text{ вип}} \cdot \Delta\tau, \text{ кг/с.}$$

Визначаємо діаметр краплі за формулою

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m_{d_i}}{\pi \cdot \rho_p}}, \text{ мкм,}$$

та перераховуємо витрату газу з поверхні краплі з урахуванням нової температури

газового потоку, $t_{1,i} = t_{\text{сум},i-1}$. Визначаємо сумарну витрату завдяки випаровуванню крапель $G_{2,i} \text{ вип}$. Процес повторюється, поки крапля повністю не випариться.

Швидкість розкладання пари КПВ. Швидкість розкладання пари КПВ характеризується параметром K (с^{-1}), який є константою швидкості хімічної реакції розкладання перекису. Згідно із законом Арреніуса

$$K = A_0 \cdot \exp(-E_a / (R_u \cdot t)),$$

де $A_0 = 10^{13} \text{ с}^{-1}$ – частотний коефіцієнт; $E_a = 200\,966,4 \text{ Дж/моль}$ (48 ккал/моль) – енергія активації [6, 8]; $R_u = 8,314\,5 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ – універсальна газова стала; t – температура, за якої відбувається реакція, К.

Ця константа дуже залежить від температури середовища, у якому відбувається розкладання КПВ, швидкість реакції помітно знижується за температур, нижчих $700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад розрахунку параметрів термічного розкладання КПВ у другій зоні ГГ

Нижче наведено приклад термодинамічного розрахунку термокаталітичного ГГ. ГГ має дві зони: першу – з каталізатором, на виході з якої відбувається повне розкладання КПВ, та другу, де ступінь розкладання та властивості продуктів розкладання залежать від параметрів впорскування вторинного потоку. Вихідні дані для термодинамічного розрахунку ГГ наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Властивості КПВ і продуктів його розкладання, які використовують у розрахунку ГГ

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Тиск газів у газогенераторі, $P_{\text{ГГ}}$	кгс/см ²	245,5
Масова витрата КПВ крізь каталізатор / крізь форсунки другої зони ГГ, $G_{\text{ГГ}1} / G_{\text{ГГ}2}$	кг/с	Див. за текстом
Температури КПВ на вході в зону з каталізатором (t_1) та на вході у форсунки другої зони ГГ ($t_{2\text{п}}$)	°C	22,1/58,3
Концентрація КПВ, σ_0	%	95
Температура первинного потоку (після каталізатора), $t_{1,0}$	°C	822,5
Густина КПВ за температури $t_{2\text{п}} = 58,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_{\text{п}}$	кг/м ³	1 380
Теплопровідність рідкого перекису k_L ($t_{2\text{п}} = 58,3 \text{ }^\circ\text{C}$)	кал/(см·с·К)	$1,468 \cdot 10^{-3}$
Теплоємність газоподібного КПВ $C_{\text{P}_{2\text{г},i}}$ в інтервалі температур 27...827 °C	ккал/(кг·К)	$C_{\text{P}_{2\text{г},i}} = -1,731\,6E - 07 \cdot t_{\text{сум},i-1}^2 + 3,212\,1E - 04 \cdot t_{\text{сум},i-1} + 3,061\,8E - 01,$ ($t_{\text{сум},i-1}$ в °C)
Теплоємність продуктів розкладання КПВ $C_{\text{P}_{1,i}}$ в інтервалі температур 350...940 °C	ккал/(кг·К)	$C_{\text{P}_{1,i}} = 0,552\,55 \cdot (0,000\,17 \cdot t_{\text{сум},i-1} + 0,429\,73) + 0,447\,45 \cdot (0,000\,04 \cdot t_{\text{сум},i-1} + 0,227\,22),$ ($t_{\text{сум},i-1}$ в °C)
Теплоємність рідкого КПВ, $C_{\text{P}_{2\text{р}}}$ (до 400 °C)	ккал/(кг·К)	0,648
Температура насиченої пари, t_{sat}	°C	146
Теплота випаровування КПВ при t_{sat} (95 % концентрація), $r_{\text{вип}}$	ккал/кг	336,3*
Теплота реакції розкладання 95 % КПВ для заданої $t_{2\text{п}}$ (58,3 °C) до утворення газоподібних продуктів розкладання, $h_{\text{рхп}}$	ккал/кг	352,45**
Початковий діаметр краплі після впорскування вторинного потоку (розрахунок для кожного діаметра виконують окремо), D_0	мкм	50, 70, 90, 120
Кількість вторинного потоку відносно сумарної витрати крізь ГГ	%	від 70 до 28 %

* згідно з даними графіка рис. 2, [9];

** розраховують за залежністю, наведено нижче.

$$h_{\text{тхп}} = \frac{Q_{t_{58}}}{3 \cdot 400} \cdot 95 - \Delta q_{\text{вип}},$$

де $Q_{t_{58}} = 24\,252,916$ кал/моль – тепловий ефект реакції розкладання підігрітого КПВ за температури t_{2p} ; $q_{\text{вип}} = 325,2$ ккал/кг – різниця в теплоті розкладання 95 % КПВ для випадку перебування води в продуктах розкладання в рідкій або газовій фазі, згідно з даними графіка (рис. 3, [9]).

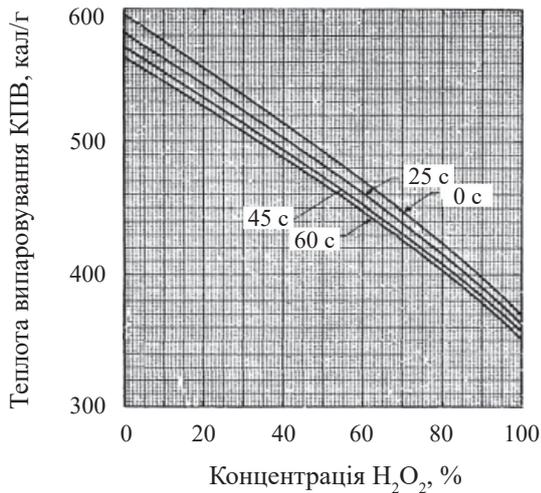


Рис. 2. Теплота випаровування КПВ за різних концентрацій і температур рідини

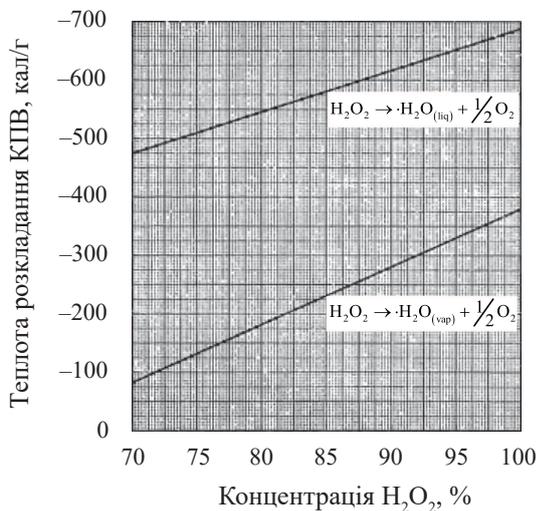


Рис. 3. Теплота розкладання КПВ за початкової температури рідини $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (вода перебуває в рідкому (liq) або газоподібному (var) стані)

Результати розрахунку та рекомендації стосовно вибору режиму роботи ГГ. Для аналізу ефективності термічного розкладання в другій зоні ГГ кількість вторинного потоку, відносно сумарної витрати крізь ГГ, розглянуто в інтервалі від 70 до 28 %.

Початковий розмір крапель впорскуваного вторинного потоку обрано з реалістичних міркувань і для наближення часу повного розкладання перекису до відомого часу перебування в ГГ.

На температуру парогазу впливає як кількість вторинного потоку, так і початковий розмір крапель у високотемпературному потоці. Результати розрахунку температур парогазу та ступеня розкладання КПВ подано на рис. 4–10. Видно, що при витраті вторинного потоку більше 40 % від сумарного відбувається заохолодження продуктів розкладання за рахунок інтенсивного випаровування крапель. Якщо температура газу спадає нижче $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для 70 % вторинної витрати – істотно нижче), швидкість реакції розкладання зменшується в рази відносно початкового моменту та процес підтримки термічного розкладання КПВ деградує (рис. 4–7).

При витратах вторинного потоку менше 40 % можна вийти на прийнятні значення температур парогазу за час перебування 4–6 мс (рис. 10). Дуже дрібне розпилення з розміром краплі 50 мкм не бажане, оскільки при такому розпиленні помітно охолоджується первинний потік через інтенсивне випаровування крапель.

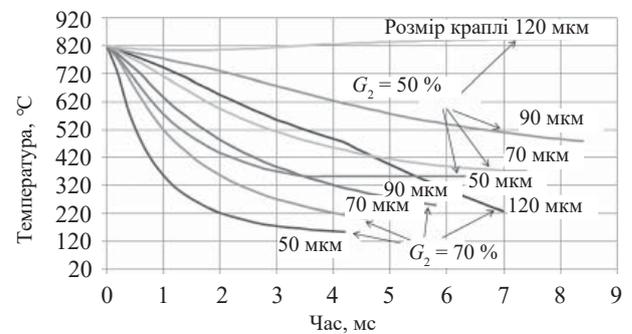


Рис. 4. Температура парогазу при витраті вторинного потоку $G_2 = 50\%$ та $G_2 = 70\%$ від сумарного

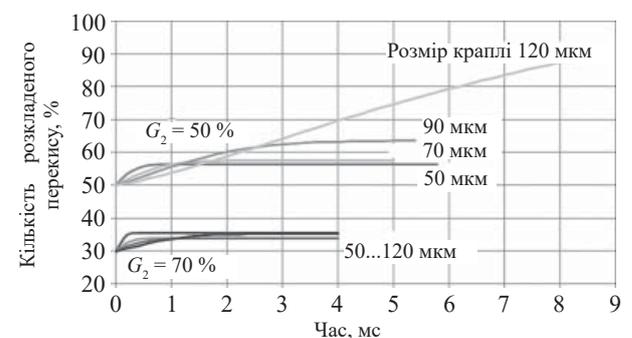


Рис. 5. Ступінь розкладання перекису у ГГ при витраті вторинного потоку $G_2 = 50\%$ та $G_2 = 70\%$ від сумарного

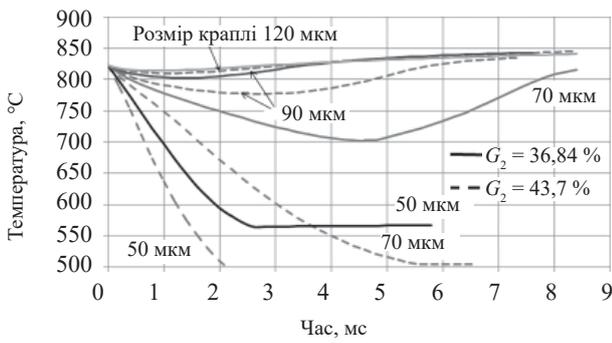


Рис. 6. Температура парогазу при витраті вторинного потоку $G_2 = 36,84\%$ та $G_2 = 43,7\%$ від сумарного

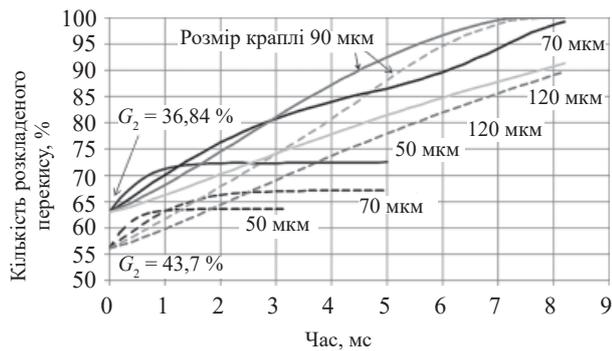


Рис. 7. Ступінь розкладання перекису в ГГ при витраті вторинного потоку $G_2 = 36,84\%$ та $G_2 = 43,7\%$ від сумарного

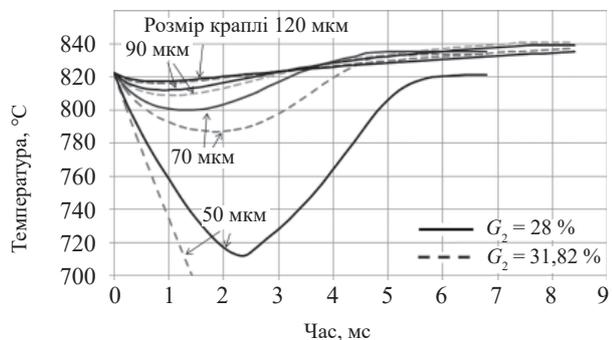


Рис. 8. Температура парогазу при витраті вторинного потоку $G_2 = 28\%$ та $G_2 = 31,82\%$ від сумарного

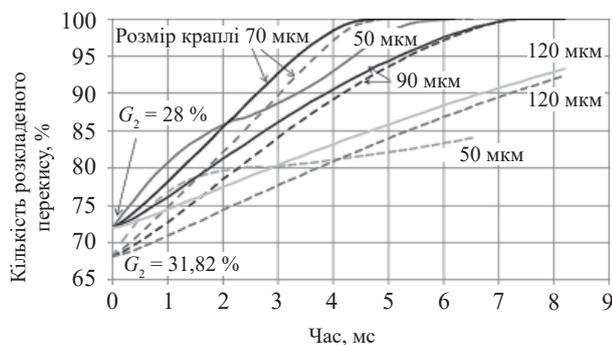


Рис. 9. Ступінь розкладання перекису в ГГ при витраті вторинного потоку $G_2 = 28\%$ та $G_2 = 31,82\%$ від сумарного

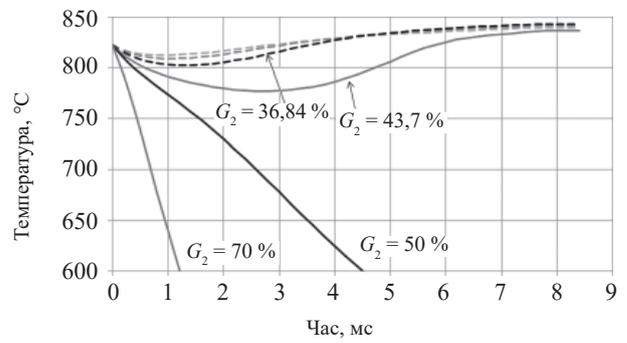


Рис. 10. Температура парогазу при початковому розмірі крапель 90 мкм і різних витратах вторинного потоку G_2 (відсоток від сумарного потоку)

З наведених результатів розрахунків зрозуміло, що дуже впливають співвідношення витрат первинного та вторинного потоків на процес розкладання КПВ у другій зоні ГГ. Надаючи рекомендації щодо вибору співвідношення цих витрат та щодо дрібності розпилення вторинного потоку, будемо виходити з потрібного часу перебування в ГГ (приблизно 6 мс), температури суміші на виході вище $830\text{ }^\circ\text{C}$ та ступеня розкладання перекису на виході з ГГ не менше 95%. Цим умовам відповідають витрати вторинного потоку G_2 (відносно сумарної витрати крізь ГГ):

- 43,7 % з розпиленням 90 мкм (строго);
- 36,84 % з розпиленням 90 мкм (строго);
- 31,82 % з розпиленням 70–90 мкм;
- 28 % з розпиленням 70–90 мкм.

У випадку подачі КПВ до ГГ з режимом $G_2 = 70\%$ процес термічного розкладання в другій зоні деградує – ГГ працювати не буде.

Висновки

Як стало зрозуміло за результатами моделювання, діапазон роботи термokatалітичного ГГ має обмеження, які пов'язані зі співвідношенням первинного та вторинного потоків у другій зоні ГГ і з дисперсністю розпилення вторинного потоку.

Значення витрати вторинного потоку дуже впливають на відстань повного протікання реакцій розкладання. Це пояснюється сильним впливом ефекту охолодження через випаровування крапель, що гальмує реакцію розкладання при великих витратах вторинного потоку. Розмір крапель також має помітний вплив на процес розкладання. Краплі розміром до 100 мкм інтенсивно випаровуються, охолоджуючи газ до того, як починається інтенсивне розкладання у га-

зовій фазі. При розпиленні більше 100 мкм процес розкладання обмежено, оскільки він залежить від швидкості випаровування з поверхні краплі. Незважаючи на місцеве охолодження потоку при дрібному розпилюванні, дистанція повного розкладання вторинного потоку буде менше. Збільшення температури крапель вторинного потоку позитивно впливає на весь процес термічного розкладання.

Кількість впорскуваного потоку у вторинну зону ГГ не повинна перевищувати 35 % від сумарної витрати, а рекомендована дрібність розпилення повинна бути в діапазоні 70–100 мкм.

При витраті вторинного потоку менше рекомендованої межової величини (25 % і менше) допустимо застосовувати спрощений розрахунок параметрів продуктів розкладання на виході із другої зони ГГ – «Модель енергетичного балансу», яку використовують для розрахунку властивостей продуктів повного розкладання КПВ. Згідно із цим підходом розрахунок параметрів парогазу необхідно проводити в такій послідовності:

– розрахувати температуру парогазу на виході з каталізатора за Моделлю енергетичного балансу;

– незалежно від параметрів потоку з першої зони ГГ розрахувати температуру продуктів розкладання КПВ вторинного потоку (з урахуванням температури рідини вторинного потоку);

– розрахувати властивості продуктів розкладання на виході з ГГ за умови повного розкладання КПВ і перемішування потоків:

$$T_{\text{ГГ}} = \frac{g_1 \cdot C_{p_1} \cdot T_1 + g_2 \cdot C_{p_2} \cdot T_2}{g_1 \cdot C_{p_1} + g_2 \cdot C_{p_2}},$$

де g_1, g_2 – масові частки потоків з каталізатора (первинний потік) і вторинний потік (у другу зону ГГ) (кг/с), відповідно; $T_1, T_2, C_{p_1}, C_{p_2}$ – температури та теплоємності потоків продуктів повного розкладання КПВ з каталізатора та вторинного потоку в зону термічного розкладання, відповідно (°C);

– визначити теплоємність суміші двох потоків:

$$C_{p_{\text{ГГ}}} = C_{p_1} \cdot g_1 + C_{p_2} \cdot g_2;$$

– визначити всі інші параметри на виході з ГГ за залежностями, що наведені в розділі «Модель енергетичного балансу».

Список використаної літератури

1. Shyshkov A. A., Rumiantsev B. V. Heneratoriy raketnykh system. M.: Mashynostroeniye. 1952. 152 s.

2. Berezanskaia E. L., Kurpatenkov V. D., Shutov N. V. Hazoheneratoriy zhydkostnykh raketnykh dvyhatelei. M.: Yzd-vo MAY. 1982. 56 s.

3. Bolharskyi A. V., Shchukyn V. K. Ra-bochye protsessy v zhydkostno-reaktyvnykh dvyhateliakh. M.: Hos. yzd-vo oboronnoi promyshlennosti. 1953. 424 s.

4. Odnokomponentnye topliva dlya GRD. Spravochnik. Tom 5. GIPH. 1961. 83 s.

5. Thermochemical analysis of hydrogen peroxide with applications to rocket design. A project report presented to the Department of Aerospace Engineering. San Jose State University. R.A. Robles, 2002.

6. Giguere P. A. The Thermal Decomposition of Hydrogen Peroxide Vapour II, Canadian Journal of Research, Chemical Sciences, Vol. 25. No. 2, 1947. P. 135–150.

<https://doi.org/10.1139/cjr47b-018>

7. Stephen R. Turns, An Introduction to Combustion, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1996. 704 p.

8. Satterfield C. N. and Stein T. W. Homogeneous Decomposition of Hydrogen Peroxide Vapour. J. of Physical Chemistry. Vol. 61, 1957. P. 537–540.

<https://doi.org/10.1021/j150551a006>

9. Consantine M. T., Cain E. F. Hydrogen Peroxide Handbook. Chemical and Material Science Department, Research Division, Rocketdyne, a Division of North American Aviation, Inc. Technical Report AFRPL-TR-67-144, July 1967. 488 p.

10. Ehorychev V. S. Raschyot y proektyrovanye smeseobrazovanyia v zhydkostnom raketnom dvyhatele. S.: Yzd-vo Samarskyi hosudarstvennyi aerokosmycheskyi universytet. 2011. 101 s.

Стаття надійшла 29.09.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування
13.10.2025

Дата публікації 12.02.2026